



A Review on Principles and Fundamentals of Fabrication of Polymeric Foams in Regards to Increasing Cell Density/ Reducing Cell Size

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Azdast T.*¹ PhD,
Hasanzadeh R.¹ MSc

How to cite this article

Azdast T, Hasanzadeh R. A Review on Principles and Fundamentals of Fabrication of Polymeric Foams in Regards to Increasing Cell Density/ Reducing Cell Size. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(1): 211-222.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran

*Correspondence

Address: Sero Street, Urmia University, Urmia, Iran. Postal Code: 1531157561
Phone: +98 (44) 31942854
Fax: +98 (44) 12773591
t.azdast@urmia.ac.ir

Article History

Received: April 11, 2018
Accepted: October 14, 2018
ePublished: January 01, 2019

ABSTRACT

Nowadays, polymeric foams have attracted special attention in scientific and industrial societies due to their unique properties such as high strength to weight ratio, excellent thermal-insulation, sound-insulation, and good mechanical properties. One of the main goals of the studies of polymeric foams is to increase the cell density and aligning with it, is to reduce the cell size of these materials. Researchers have shown that the extraordinary properties of polymeric foams such as superior thermal-insulation can be achieved by increasing the cell density/ decreasing the cell size. In this regard, firstly the most important processes for the production of polymeric foams (batch, extrusion, and injection molding processes) were studied in the present research. Then, cell nucleation stage as the most important process for achieving high cell density/ low cell size is studied in details. In the following, the most important researches in the field of polymeric foams were introduced in which, the highest cell densities/ lowest cell sizes were achieved. The investigations show that the most significant results (highest cell densities/ lowest cell sizes) are belonging to the batch process. Also, the use of nucleating agents, increasing the solubility of blowing agent into the polymer, and the use of nanoparticles are the most efficient solutions in order to achieve microcellular and nanocellular structures.

Keywords Polymeric Foam; Cell Nucleation; Processing Methods; Cell Density; Cell Size

CITATION LINKS

[1] Handbook of ... [2] Polymeric foams ... [3] Thermally insulating ... [4] Enhanced acoustic ... [5] Towards a new generation ... [6] Thermoplastic foams ... [7] Styrene-maleic ... [8] Polymeric foams ... [9] A multi-criteria ... [10] Microcellular to nanocellular ... [11] Fracture toughness ... [12] Experimental characterization ... [13] Cell morphology and ... [14] Preparation of microcellular ... [15] Experimental validation ... [16] Modelling of thermal ... [17] Polymer foaming with ... [18] Supercritical carbon ... [19] New challenges ... [20] Extrusion foaming ... [21] Correlations between ... [22] Correlation between ... [23] Injection-molded solid ... [24] Microcellular injection ... [25] Development of high ... [26] Mechanical and morphological ... [27] Novel lightweight ... [28] Foam injection ... [29] Experimental investigation ... [30] Nucleation of microcellular ... [31] The nucleation of ... [32] Bubble size ... [33] Origins of the failure ... [34] A microcellular foaming ... [35] Mechanism of extensional ... [36] Mechanisms of nanoclay-enhanced ... [37] Change in the ... [38] The effect of dispersed ... [39] Nucleation ... [40] Size effect in ... [41] Heterogeneous nucleation ... [42] Prediction of bubble ... [43] Determination of solubilities ... [44] Solubility of polymers ... [45] General strategy ... [46] Processing and characterization ... [47] Effect of talc content ... [48] The effects of extensional ... [49] Conventional and nanometric ... [50] Ideal surface ... [51] The heterogeneous nucleation ... [52] Why is it much ... [53] Numerical investigation ... [54] HDPE-clay nanocomposite ... [55] The influence of carbon ... [56] Effect of growing ... [57] Fundamental mechanisms ... [58] Simultaneous decision ... [59] Structural properties ... [60] Low density thermoplastic ... [61] Experimental study ... [62] Homogeneous nanocellular ... [63] Some thermodynamic ... [64] Key production parameters ... [65] Effects of clay dispersion ... [66] Physical extruder ... [67] In situ fibrillation ... [68] Influence of graphene ... [69] Quantitative analysis ... [70] Effect of foam processing ... [71] Cell morphology and ... [72] Mechanical properties ... [73] Effects of hydrophobic-modified ... [74] Development of high thermal ...

مروری بر اصول و مبانی تولید فوم‌های پلیمری در راستای افزایش چگالی سلولی/کاهش اندازه سلولی

طاهر ازدست * PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

زرگار حسن زاده MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

امروزه فوم‌های پلیمری به دلیل خواص منحصر به فردشان توجهات ویژه‌ای را در جوامع علمی و صنعتی به خود اختصاص داده‌اند. از جمله این خواص می‌توان به نسبت استحکام به وزن بالا، عایق حرارتی بسیار عالی، عایق صوتی و خواص مکانیکی خوب آنها اشاره کرد. یکی از اهداف تحقیقات روز دنیا در زمینه فوم‌های پلیمری، افزایش چگالی سلولی و همراستا با آن کاهش اندازه سلولی این مواد است. محققان نشان داده‌اند که با افزایش چگالی سلولی/کاهش اندازه سلولی می‌توان به خواص فوق‌العاده فوم‌های پلیمری از جمله خواص فوق‌عایق حرارتی دست یافت. در تحقیق حاضر پس از معرفی مهم‌ترین روش‌های فرآیندی تولید فوم‌های پلیمری (روش‌های توده‌ای، اکستروژن و قالب‌گیری تزریقی) مرحله هسته‌زایی سلولی که مهم‌ترین پروسه در دست‌یابی به چگالی سلولی بالا/اندازه سلولی پایین است به صورت مفصل بررسی شده است. در ادامه مهم‌ترین تحقیقات روز دنیا در زمینه فوم‌های پلیمری که در آنها محققین به بالاترین چگالی‌های سلولی/کمترین اندازه‌های سلولی دست یافته‌اند، معرفی شده‌اند. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که چشم‌گیرترین نتایج بین روش‌های فرآیندی متعلق به روش توده‌ای است. همچنین از بین راهکارهای افزایش چگالی سلولی/کاهش اندازه سلولی، استفاده از عوامل هسته‌زا، افزایش حلالیت گاز داخل پلیمر و استفاده از نانوذرات را می‌توان به‌عنوان کارآمدترین راهکارها به‌منظور دست‌یابی به ساختارهای میکروسلولی و نانوسلولی معرفی کرد. **کلیدواژه‌ها:** فوم پلیمری، هسته‌زایی سلولی، روش‌های فرآیندی، چگالی سلولی، اندازه سلولی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۲

*نویسنده مسئول: t.azdast@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

پلیمر یک ماده بسیار فراگیر و رایج در ساخت و تولید قطعات است. یکی از خواص مهم پلیمرها، انعطاف‌پذیری آنها است. پلیمر می‌تواند به راحتی و به‌ارزانی تغییر شکل یابد، به همین دلیل امروزه بسیاری از قطعات از پلیمر ساخته می‌شوند [1]. امروزه در هر جا که از پلیمرهای جامد استفاده می‌شود، می‌توان برای کاهش مقدار ماده مصرفی وارد عمل شد. این صرفه‌جویی در هزینه‌های ماده مصرفی و حمل و نقل، در بسیاری از موارد اثر مهمی به‌جای می‌گذارد. روش تولید فوم یا ایجاد حباب در توده ماده (خصوصاً مواد پلیمری) یکی از روش‌های کاهش مواد مصرفی است، به شرطی که بر عملکرد قطعه تاثیر منفی نگذارد [2]. استفاده از فوم سبب کاهش وزن، کاهش هزینه و بهبود خصوصیات ظاهری عایق حرارتی [3] و عایق صوتی [4] می‌شود.

براساس گزارش "آینده فوم‌های پلیمری تا ۲۰۱۹" در سال ۲۰۱۳، فوم‌های پلیمری حدود ۱۹/۱ میلیون تُن از بازار جهانی را به خود اختصاص داده بودند. این بازار، رقمی حدود ۸۷ میلیارد دلار شامل استفاده در صنایعی نظیر خودروسازی، هوافضا، بسته‌بندی، ساخت و ساز و غیره می‌شد. علاوه بر این، انتظار می‌رود که این بازار با رشدی پیوسته به ۲۵/۱ میلیون تُن در سال ۲۰۱۹ برسد [5].

یک فوم پلیمری اساساً مخلوطی از پلیمر/گاز است که به ماده،

ساختار سلولی می‌بخشد. فوم‌های پلیمری بسته به هندسه سلولی‌شان مانند سلول باز یا بسته‌بودن می‌توانند صلب یا انعطاف‌پذیر باشند [6]. اگر منافذ گاز توسط ماتریس پلیمری کاملاً از یکدیگر جدا شده باشند، ساختار سلول بسته نامیده می‌شود. در مقابل، اگر منافذ به‌حدی با یکدیگر مرتبط باشند که گاز بتواند از طریق سلول‌ها جریان یابد، ساختار سلول باز نامیده می‌شود. فوم‌های با ساختار سلول باز برای کاربردهایی مانند عایق‌های صوتی، مبلمان و غیره مناسب هستند، در حالی که فوم‌های سلول بسته برای عایق‌های حرارتی مناسب هستند و به‌طور کلی به دلیل صلب‌بودن آنها، مواد سبک‌وزن مناسبی برای صنایع خودروسازی و هوافضا هستند [7, 8].

دو خاصیت مهمی که برای بررسی کیفیت ساختار سلولی فوم‌های پلیمری استفاده می‌شود، چگالی سلولی و اندازه سلولی است. این دو خاصیت مجزا از هم نیستند و در حجم ثابت پلیمر با یکدیگر نسبت عکس دارند. طبق تعریف، چگالی سلولی، تعداد سلول‌های موجود در یک سانتی‌متر مکعب از فوم‌های پلیمری است [7]. فوم‌های پلیمری از لحاظ چگالی سلولی و اندازه سلولی به چهار دسته زیر تقسیم می‌شوند [9]:

- ۱- فوم‌های پلیمری مرسوم با اندازه سلولی بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرومتر و چگالی سلولی کمتر از ۱۰ سلول در سانتی‌متر مکعب
 - ۲- فوم‌های پلیمری ریزسلولی با اندازه سلولی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر و چگالی سلولی بین ۱۰^۶ تا ۱۰^۸ سلول در سانتی‌متر مکعب
 - ۳- فوم‌های پلیمری میکروسلولی با اندازه سلولی بین یک تا ۱۰ میکرومتر و چگالی سلولی بین ۱۰^۸ تا ۱۰^{۱۰} سلول در سانتی‌متر مکعب
 - ۴- فوم‌های پلیمری نانوسلولی با اندازه سلولی کمتر از یک میکرومتر و چگالی سلولی بیشتر از ۱۰^{۱۰} سلول در سانتی‌متر مکعب.
- توسعه فوم‌های پلیمری در دهه ۱۹۳۰ میلادی با فوم‌های مرسوم پلی‌استایرن با اندازه‌های سلولی بالای ۱۰۰ میکرومتر شروع شد [10]. پیشرفت فوم‌های پلیمری با ابداع روش فوم‌کردن حالت جامد توده‌ای ادامه یافت و فوم‌های ریزسلولی با اندازه‌های سلولی کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرومتر در دهه ۱۹۸۰ میلادی حاصل شد [6].

در سالیان اخیر تحقیقات متعددی در زمینه فوم‌های پلیمری به‌ویژه در محدوده‌های ریزسلولی و میکروسلولی صورت گرفته است. خواص مختلف فوم‌های پلیمری به هر دو خواص ماتریس پلیمری و ساختار سلولی بستگی دارد. دو راهبرد کارآمد افزایش همگنی ساختار سلولی (داشتن توزیع اندازه سلولی بسیار باریک) [11] و کاهش اندازه سلولی فوم [12] را می‌توان برای بهبود خواص مختلف در پیشینه پژوهش یافت. از جمله مزایای کاهش اندازه سلولی می‌توان به بهبود خواص مکانیکی اشاره کرد [13, 14]. همچنین با کاهش اندازه‌های سلولی به کمتر از یک میکرومتر و فعال شدن اثر نادن، خواص عایق حرارتی به‌صورتی کاملاً چشمگیر بهبود پیدا می‌کند [15, 16]. ضریب هدایت حرارتی از طریق فاز گاز که بیشترین سهم ضریب هدایت حرارتی کل در فوم‌های پلیمری را به خود اختصاص داده است [15, 16]، با کاهش اندازه سلولی کاهش می‌یابد، به‌صورتی که در اندازه‌های سلولی یک میکرومتر به ۲۰ mW/mK می‌رسد. همچنین با رسیدن اندازه سلولی به مقدار ۷۰ نانومتر، ضریب هدایت حرارتی گاز، یک‌سوم خواهد شد. بنابراین برای دستیابی به خواص خارق‌العاده فوم‌های پلیمری مانند خواص فوق‌عایق حرارتی نیاز است که اندازه‌های سلولی کاهش یابد و فوم‌های پلیمری میکروسلولی و نانوسلولی حاصل شود. در همین راستا، در تحقیق حاضر ابتدا روش‌های تولید فوم‌های پلیمری شرح داده و سپس هسته‌زایی سلولی که مهم‌ترین مرحله به‌منظور حصول

مدت‌زمان معینی قرار می‌گیرد تا هسته‌زایی سلولی اتفاق بیفتد و سپس رشد سلولی آغاز شود.

دمای روغن گرم و زمان قرارگیری نمونه داخل روغن به ترتیب به‌عنوان دما و زمان فوم‌شدن در نظر گرفته می‌شوند. پس از این مرحله، نمونه در داخل حمام آب یا حلال به‌منظور خنک‌کاری قرار داده می‌شود تا پایداری سلولی به وقوع بپیوندد [10]. این روش فوم را اصطلاحاً روش توده‌ای دومرحله‌ای می‌گویند. نکته مهم در فوم توده‌ای، هندسه نمونه پلیمری است. این نمونه‌ها معمولاً دیسک‌های دایره‌ای، مستطیلی یا مربعی‌شکل با ضخامت‌های تا چند میلی‌متر هستند، به‌گونه‌ای که مانع از نفوذ گاز نشوند. قابل ذکر بوده که روش فوم توده‌ای کاربرد آزمایشگاهی داشته است، در راستای تحقیقات روز دنیا به کار گرفته می‌شود و جنبه صنعتی ندارد.

۲-۲- روش فوم اکستروژن

در فوم اکستروژن، یک خط اکستروژن به سیستم تامین گاز مجهز شده است. گرانول‌هایی که از طریق قیف به سیلندر وارد شده‌اند، تحت فشار زیاد و عامل فوم‌زا مذاب می‌شوند. گاز (معمولاً کربن‌دی‌اکسید) در حالت فوق بحرانی به داخل پلیمر تزریق می‌شود. به دلیل فشار بالای داخل سیلندر، از هسته‌زایی سلولی فوم جلوگیری می‌شود. به محض این که پلیمر از قالب خارج می‌شود، سلول‌ها به دلیل افت فشار ناگهانی تشکیل می‌شوند (مرحله هسته‌زایی)، رشد می‌یابند و در مرحله آخر با خنک‌کاری داخل حمام آب، پایداری سلولی حاصل می‌شود [18-20].

فرآیند فوم اکستروژن می‌تواند هم به‌صورت شیمیایی و هم فیزیکی صورت گیرد. فوم اکستروژن شیمیایی به دلیل قیمت ارزان آن از لحاظ ابزار و وسایل در کاربردهای صنعتی استفاده می‌شود. در فوم اکستروژن شیمیایی، گرانول‌های پلیمر و عامل فوم‌زای شیمیایی در داخل ماردون اختلاط می‌شود و گرمای ماردون، عامل فوم‌زای شیمیایی را تجزیه می‌کند که گاز منتهی، باعث انبساط پلیمر به محض خروج آن از قالب می‌شود. دمای مذاب، پارامتری کلیدی در تجزیه عامل فوم‌زا است. همچنین فشار باید به‌اندازه‌ای بالا باشد تا قبل از خروج مواد از قالب، گاز را به‌صورت محلول در پلیمر نگه دارد. اگر دما و فشار به‌خوبی تنظیم نشده باشند، عامل فوم‌زا تجزیه نخواهد شد و ممکن است ذرات باقیمانده یا کلوخه‌هایی از عامل فوم‌زا ایجاد شود که می‌تواند منجر به ساختار سلولی ضعیف یا کیفیت سطح پایین شود [17]. معروف‌ترین عامل فوم‌زای شیمیایی، آزودی‌کربن‌امید بوده که یک عامل فوم‌زای گرمازا است. آزودی‌کربن‌امید مقادیر زیادی گاز نیتروژن همراه با مقادیر کمی کربن‌دی‌اکسید به داخل پلیمر آزاد می‌کند. امروزه، به دلیل فرآورده‌های جانبی سمی آزودی‌کربن‌امید، عوامل فوم‌زای تجاری گرماگیری مانند هیدروسول رواج یافته‌اند [17, 21]. قابل ذکر است که روش فوم اکستروژن از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه بوده و برای تولیدات انبوه، گزینه مناسبی است. ضمن این که تقریباً بیشترین میزان فوم‌شدن بین روش‌های تولیدی را دارد.

۲-۳- روش فوم قالب‌گیری تزریقی

فوم قالب‌گیری تزریقی از لحاظ فرآیندی به دو دسته فوم‌های قالب‌گیری تزریقی فشار پایین (LPFIM) و فشار بالا (HPFIM) تقسیم می‌شوند. در روش فوم قالب‌گیری تزریقی فشار پایین، قسمتی از قالب توسط فرآیند تزریق به‌وسیله مذاب تک‌فاز پلیمر اشباع‌شده از عامل فوم‌زا پر می‌شود. فوم‌شدن در اثر ورود مذاب به قالب و به‌علت افت فشار اتفاق می‌افتد و قسمت خالی قالب در اثر انبساط ناشی از فرآیند فوم‌شدن، پر می‌شود. شماتیک این فرآیند را می‌توان در شکل ۲ مشاهده نمود. از جمله مزایای این روش

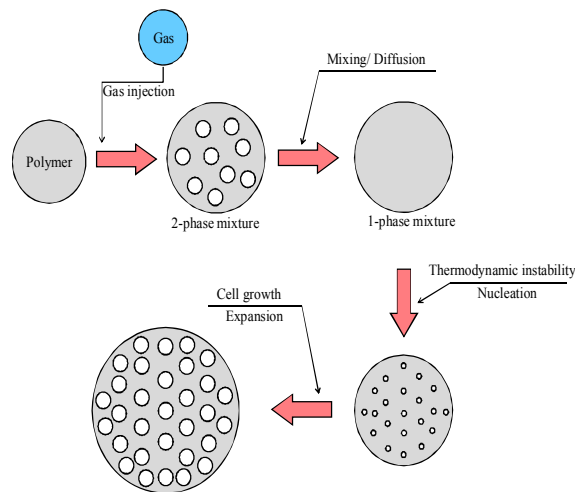
فوم‌های پلیمری با اندازه‌های سلولی مد نظر است، به‌صورت مفصل شرح داده خواهد شد. در ادامه، مهم‌ترین راهکارها برای افزایش چگالی سلولی یا کاهش اندازه‌های سلولی، بیان و در انتها مهم‌ترین تحقیقات سالیان اخیر در زمینه افزایش چگالی سلولی/ کاهش اندازه سلولی مرور می‌شود.

۲- مراحل و روش‌های تولید فوم‌های پلیمری

ابتدا در این بخش مراحل فرآیند فوم، تشریح و سپس در ادامه مهم‌ترین روش‌های تولید فوم‌های پلیمری بررسی خواهد شد.

۲-۱- مراحل فرآیند فوم

شکل ۱، شماتیک فرآیند فوم را نشان می‌دهد. اصول فرآیند فوم، با جذب گاز و تشکیل مخلوط پلیمر/گاز شروع می‌شود. سپس به‌وسیله اختلاطی که صورت می‌گیرد (مثلاً توسط چرخش ماردون در فرآیند اکستروژن) یا نفوذ گاز به داخل پلیمر (مثلاً در فرآیند توده‌ای)، مخلوطی تک‌فاز از پلیمر/گاز تشکیل می‌شود. پس از آن، در اثر یک ناپایداری ترمودینامیک که معمولاً به‌وسیله افت فشار یا افزایش دما به وجود می‌آید، هسته‌زایی رخ می‌دهد. در مرحله بعدی، سلول‌های تشکیل‌شده رشد پیدا می‌کند و انبساط فوم به وقوع می‌پیوندد. در نهایت بایستی سلول‌های رشدیافته به پایداری برسند. شرایط فرآیندی اهمیت بسیار بالایی در فرآیند فوم داشته است و بایستی محدوده آنها به‌درستی انتخاب شود [17]. مراحل فرآیند فوم تقریباً در تمامی روش‌های تولیدی یکسان است. مهم‌ترین روش‌های تولید فوم‌های پلیمری، روش‌های فوم توده‌ای، اکستروژن و قالب‌گیری تزریقی هستند.



شکل ۱) شماتیک فرآیند فوم

۲-۱- روش فوم توده‌ای

فوم توده‌ای می‌تواند به دو روش مختلف ناشی از فشار و ناشی از دما انجام گیرد. در روش ناشی از فشار، پلیمر در یک دمای مشخص در یک محفظه تحت عامل فوم‌زای فشار بالا، اشباع می‌شود و سپس، هسته‌زایی سلولی توسط افت فشار ناگهانی سیستم تا فشار اتمسفر اتفاق می‌افتد. پایداری سلولی نهایی توسط خنک‌کاری فوم پلیمری در یک حلال یا در هوا حاصل می‌شود [10]. این روش فوم اصطلاحاً روش توده‌ای تک‌مرحله‌ای نامیده می‌شود. در روش ناشی از دما، شروع فرآیند مشابه روش ناشی از فشار، ولی در دماهای پایین‌تر است. پس از این که اشباع کامل شد، نمونه از محفظه خارج می‌شود و در داخل حمام روغن (معمولاً گلیسرول) گرم به

زمانی که قالب پُر شد، فشار نگهداری به‌میزانی بالا می‌رود که سلول‌های تشکیل‌شده را منهدم کند و دوباره به داخل مذاب برگرداند. بدین ترتیب تمامی سلول‌ها منهدم می‌شوند و گاز داخل سلول‌ها به داخل پلیمر بر می‌گردد. در ادامه با برداشته شدن فشار نگهداری، فوم شدن به‌صورت کاملاً یکنواخت اتفاق می‌افتد. مزیت اصلی این روش نسبت به روش فشار پایین، دستیابی به ساختار سلولی یکنواخت است. همچنین این روش زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که دقت ابعادی بالایی مد نظر است. میزان فوم شدن در این روش به اندازه میزان انقباض رخ می‌دهد.

در ادامه، مرحله هسته‌زایی سلولی که مهم‌ترین مرحله به‌منظور دستیابی به چگالی سلولی بالا/اندازه سلولی پایین است، به‌صورت مفصل بررسی و مدل‌های مختلف به‌منظور بررسی این فرآیند بیان خواهد شد.

۳- هسته‌زایی سلولی

همان‌طور که توضیح داده شد، فرآیند فوم با حل شدن میزان مشخصی گاز در داخل پلیمر آغاز می‌شود و پس از تشکیل مخلوط تک‌فاز پلیمر/گاز در اثر یک ناپایداری ترمودینامیک، هسته‌زایی سلولی اتفاق می‌افتد. هر چه بتوان نرخ هسته‌زایی یا به عبارتی چگالی سلولی را بالا برد، می‌توان به اندازه‌های سلولی پایین‌تری دست یافت و فوم‌های پلیمری میکرو یا نانوسلولی تولید کرد [29].

تاکنون مدل‌های مختلفی برای بررسی مرحله هسته‌زایی در تولید فوم‌های پلیمری ارائه شده است. از دیدگاه فرض‌هایی که در این مدل‌ها صورت می‌گیرد، می‌توان مدل‌های هسته‌زایی را به دو دسته مدل‌های هسته‌زایی کلاسیک (CNT) و واقعی تقسیم کرد. در مدل هسته‌زایی کلاسیک، فرض بر این است که هسته‌ها به خودی خود تشکیل می‌شوند، در حالی که در مدل واقعی، تشکیل سلول‌ها مبتنی بر وجود حفره‌هایی اولیه است که سلول‌ها در اثر جوانه‌زنی روی این حفره‌های قبلی تشکیل می‌شوند. از دیدگاه عامل‌های هسته‌زا، مدل‌های هسته‌زایی به دو دسته مدل‌های همگن و غیرهمگن تقسیم می‌شوند. در مدل همگن فرض بر این است که احتمال وقوع هسته‌زایی در سراسر مخلوط پلیمر/گاز یکسان است، در حالی که در مدل غیرهمگن به‌دلیل وجود عامل‌های هسته‌زا که به‌عنوان نقاط بحرانی برای به‌وقوع پیوستن هسته‌زایی عمل می‌کنند، احتمال هسته‌زایی در سراسر مخلوط پلیمر/گاز یکسان نیست [30-32].

در ادامه به بررسی مدل‌های هسته‌زایی ارائه شده، پرداخته می‌شود. ابتدا مدل‌های کلاسیک و واقعی در هسته‌زایی همگن بررسی می‌شود و در ادامه، مدل کلاسیک و واقعی در هسته‌زایی غیرهمگن ارائه می‌شود.

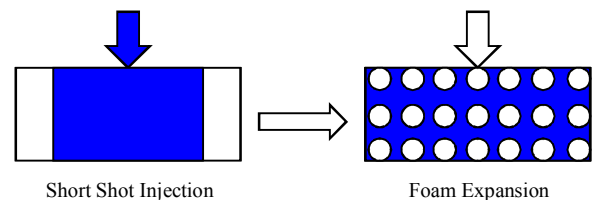
۳-۱-۳- هسته‌زایی همگن

۳-۱-۱-۳- هسته‌زایی همگن کلاسیک

در خصوص مدل هسته‌زایی کلاسیک، سه فرض اساسی وجود دارد که در ادامه به بیان فرض‌ها و تفاوت آنها با حالت واقعی پرداخته می‌شود. اولین فرضی، عدم وابستگی کشش سطحی به شعاع حباب است، در حالی که در حالت واقعی، کشش سطحی با تغییر شعاع حباب به‌دلیل تغییر طول تماس تغییر خواهد کرد [33, 34]. دومین فرض در مدل هسته‌زایی کلاسیک، فرض تغییر ناگهانی چگالی در فصل مشترک بین حباب و پلیمر است، در حالی که در حالت واقعی، فصل مشترک بین سلول و پلیمر مرز مشخصی ندارد و این مرز حالتی ابرمانند دارد [33]. سومین فرضی که در مدل هسته‌زایی کلاسیک در نظر گرفته می‌شود، تئوری عدم وجود حفره

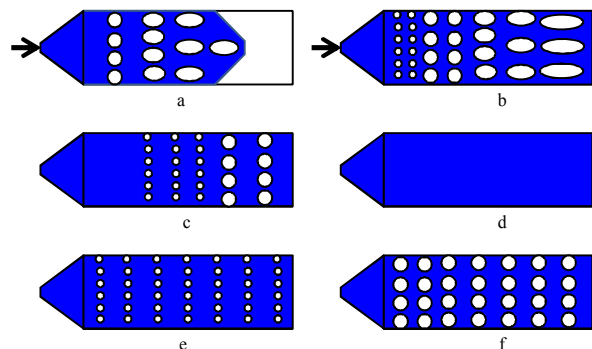
می‌توان به نیروی ایجادشده در روش فشار پایین اشاره کرد که به مراتب (حدود ۲۰ برابر) کمتر از روش فشار بالاست [22, 23]. بنابراین امکان تولید قطعات بزرگ توسط ماشین‌های تزریق با تناژ پایین وجود دارد. همچنین به‌دلیل استفاده از فشارهای کم، هزینه‌های مربوط به انرژی در این روش پایین‌تر است [24]. علاوه بر این، امکان استفاده از قالب‌های آلومینیومی که هزینه‌های پایین‌تری را در بر خواهند داشت، یکی دیگر از مزایای این روش فوم کردن است.

دوره‌های سریع‌تر تولید قطعات فوم پلیمری به‌دلیل انتقال حرارت بهتر آلومینیوم را می‌توان به‌عنوان یکی دیگر از مزایای این روش برشمرد، هر چند که این روش نیز معایبی دارد. قطعات فوم تولیدی به روش قالب‌گیری تزریقی فشار پایین به‌دلیل اندازه سلولی‌های بالا، خواص مکانیکی ضعیفی دارند [25]. چگالی‌های سلولی حاصل از این روش فوم کردن معمولاً بین ۱۰ تا ۱۰^۳ سلول در سانتی‌متر مکعب است و ساختار سلولی غیریکنواختی حاصل می‌شود. همچنین قطعات فوم‌شده توسط این روش، کیفیت سطح پایینی دارند [26]. بنابراین بایستی روش‌های بهتری را جایگزین این روش نمود.



شکل ۲) شماتیک روش فوم قالب‌گیری تزریقی فشار پایین

به‌دلیل معایبی که روش فوم کردن قالب‌گیری تزریقی فشار پایین دارد، روش فوم قالب‌گیری تزریقی فشار بالا جایگزین آن شد. شماتیک این فرآیند در شکل ۳ نشان داده شده است [27, 28]. در این روش، تمامی قالب توسط فرآیند تزریق پُر می‌شود. با ورود مذاب به داخل حفره قالب و در اثر اُفت فشار، فوم شدن و تشکیل سلول‌ها از گیت شروع می‌شود. قابل ذکر است که سلول‌های تشکیل‌شده در این مرحله، غیریکنواخت هستند. برای بیان دلیل این امر می‌توان به ذکر چند نکته پرداخت. اختلاف فشار و دما در نقاط مختلف حفره وجود دارد. همچنین از ابتدای دریچه که سلول‌ها تشکیل می‌شوند، تا پُر شدن کامل حفره، رشد خواهند داشت و احتمال ادغام و به‌هم پیوستن و در نتیجه درشت شدن برخی از سلول‌ها وجود دارد. علاوه بر این، حباب‌های این مرحله در طول پُر شدن حفره، کشیده خواهند شد و از حالت کروی و متقارن خارج می‌شوند.



شکل ۳) شماتیک روش فوم قالب‌گیری تزریقی فشار بالا: (a) پُر شدن قالب و هسته‌زایی سلول‌ها در گیت، (b) قالب پُر شده و رشد سلولی غیریکنواخت، (c) منهدم شدن و انحلال سلول‌های تشکیل‌شده در گیت در اثر فشار نگهداری بالا، (d) ناپدید شدن تمام حباب‌ها، (e) هسته‌زایی مجدد در اثر انقباض، (f) رشد سلولی یکنواخت

دو پارامتر $P_{bub,1}$ و $R_{bub,1}$ مستقل از $R_{bub,2}$ هستند، با مشتق‌گیری از رابطه ۶ بر حسب $R_{bub,2}$ و مساوی صفر قراردادن آن، میزان شعاع بحرانی برای این مدل مطابق با رابطه ۷ حاصل می‌شود.

$$R_{cr} = \frac{2\gamma_{lg}}{P_{bub,2} - P_{local}} \quad (۷)$$

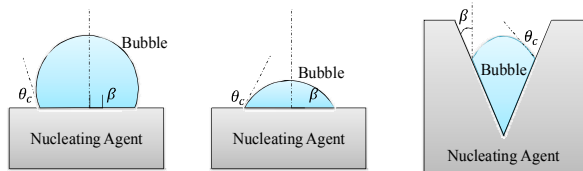
با مقایسه رابطه‌های ۴ و ۷ مشخص می‌شود که میزان شعاع بحرانی برای هر دو مدل کلاسیک و واقعی در هسته‌زایی همگن یکسان است. با جای‌گذاری میزان شعاع بحرانی در رابطه ۶، میزان کار بحرانی برای این مدل مطابق با رابطه ۸ حاصل می‌شود.

$$\Delta W_{cr} = \frac{16\pi\gamma_{lg}^3}{3(P_{bub} - P_{local})^2} - \text{constant} \quad (۸)$$

رابطه ۸ نشان می‌دهد که در هسته‌زایی همگن، میزان کار بحرانی مورد انتظار برای رساندن شعاع حباب‌ها به میزان بحرانی در مدل واقعی کمتر از مدل کلاسیک است که این مطلب در تحقیقات پیشین نیز به چشم می‌خورد [38]. هر چه میزان شعاع بحرانی و مقدار انرژی بحرانی پایین‌تر باشد، تعداد سلول‌های بیشتری می‌توانند به مرز بحرانی (مرز رسیدن به شرایط رشد خودبه‌خودی) برسند و تعداد سلول‌ها بیشتر می‌شود و چگالی سلولی افزایش می‌یابد که افزایش چگالی سلولی همان طور که بیان شد، متعاقباً موجب کاهش اندازه سلولی می‌شود.

۲-۳- هسته‌زایی غیرهمگن

مدل‌های هسته‌زایی که تاکنون معرفی شدند، مدل‌های هسته‌زایی همگنی هستند که بدون وجود عوامل خارجی تشکیل می‌شوند و فرض بر این است که امکان هسته‌زایی در سراسر پلیمر یکسان است. اما با اضافه‌شدن عوامل خارجی به نام عوامل هسته‌زا مانند پودر تالک، سدیم‌بنزوات و غیره، مکان‌هایی ترجیحی برای هسته‌زایی ایجاد می‌شود که احتمال هسته‌زایی در آنها بیشتر از سایر مناطق است. به عبارتی دیگر هسته‌زایی در سراسر پلیمر به صورت یکنواخت صورت نمی‌گیرد و مدل هسته‌زایی غیرهمگن است [39, 40]. شکل ۴ [39, 40] تعدادی از هسته‌زایی‌های غیرهمگن محتمل در حضور عوامل هسته‌زا را نشان می‌دهد. در شکل ۴، β و θ_c به ترتیب زاویه بین خط عمود و سطح عامل هسته‌زا و زاویه بین خط مماس بر حباب و سطح عامل هسته‌زا هستند. در ادامه هر دو مدل هسته‌زایی غیرهمگن یعنی مدل کلاسیک (عدم وجود حفره قبلی) و واقعی (وجود حفره قبلی) بررسی خواهد شد.



$$\beta = 90^\circ, \theta_c < 90^\circ$$

$$\beta = 90^\circ, \theta_c > 90^\circ$$

$$\beta < 90^\circ, \theta_c < \beta + 90^\circ$$

شکل ۴ مدل‌های محتمل هسته‌زایی غیرهمگن

۳-۲-۱- هسته‌زایی غیرهمگن کلاسیک

مطابق با این مدل، میزان تغییرات کار براساس مدل هسته‌زایی کلاسیک مطابق با رابطه ۹ به دست می‌آید.

$$\Delta W_{het} = -(P_{bub} - P_{local})V_{bub} + (\gamma_{sg} - \gamma_{sl})A_{sg} + \gamma_{lg}A_{lg} \quad (۹)$$

که در این رابطه، A_{lg} و A_{sg} به ترتیب سطح تماس بین حباب و عامل هسته‌زا و سطح تماس بین حباب و پلیمر مذاب هستند.

قبلی است. در این مدل فرض می‌شود که سلول‌ها از فضای تهی به صورت ناگهانی تشکیل می‌شوند که این فرض می‌تواند خطاهایی را ایجاد کند و در حالت واقعی صحیح نیست. در حالت واقعی، سلول‌های ایجادشده از حفره‌هایی تشکیل می‌شوند که قبلاً وجود داشته‌اند. این حفره‌ها یا می‌توانند از قبل موجود باشند یا به صورت موقتی به وسیله جریان مذاب داخل تجهیزات فرآیندی به وجود آیند [33, 35].

در ادامه به تحلیل میزان کار بحرانی (W_{cr}) مورد نیاز برای هسته‌زایی همگن براساس مدل هسته‌زایی کلاسیک (فرض عدم وجود حفره‌های قبلی) پرداخته می‌شود. قابل ذکر است که در مدل واقعی نیز دو فرض اول شامل مستقل‌بودن کشش سطحی از شعاع و تغییر ناگهانی چگالی در فصل مشترک حباب و پلیمر با وجود ایجاد خطاهای کوچک در نظر گرفته می‌شود و تنها تفاوت مدل هسته‌زایی کلاسیک و مدل واقعی مبتنی بر عدم وجود یا وجود حفره‌های قبلی است.

براساس مدل هسته‌زایی همگن کلاسیک تغییرات کار از حالت ۱ به حالت ۲ مطابق با رابطه ۱ محاسبه می‌شود [36].

$$\Delta W_{hom} = -(P_{bub} - P_{local})V_{bub} + \gamma_{lg}A_{bub} \quad (۱)$$

که در این رابطه، P_{bub} فشار حباب، P_{local} فشار موضعی، V_{bub} و A_{bub} به ترتیب حجم و مساحت حباب و γ_{lg} میزان کشش سطحی بین حباب و پلیمر مذاب است.

با جای‌گذاری مساحت و حجم حباب در رابطه ۱، رابطه ۲ حاصل می‌شود.

$$\Delta W_{hom} = -(P_{bub} - P_{local})\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right) + \gamma_{lg}(4\pi R^2) \quad (۲)$$

که R شعاع حباب است. با مشتق‌گیری از رابطه ۲ نسبت به شعاع (رابطه ۳)، میزان شعاع بحرانی (R_{cr}) به صورت رابطه ۴ حاصل می‌شود:

$$\frac{d\Delta W_{hom}}{dR} = 0 \rightarrow 4\pi R_{cr}(-(P_{bub} - P_{local})R_{cr} + 2\gamma_{lg}) = 0 \quad (۳)$$

$$R_{cr} = \frac{2\gamma_{lg}}{P_{bub} - P_{local}} \quad (۴)$$

از لحاظ ترمودینامیک مفهوم شعاع بحرانی که از رابطه ۴ حاصل می‌شود، به این صورت است که اگر شعاع سلول به میزان شعاع بحرانی برسد (میزان کار بحرانی برای رسیدن به شعاع بحرانی را دریافت کند)، می‌تواند رشد خودبه‌خودی داشته باشد، در غیر این صورت سلول، منهدم و نابود می‌شود [37]. با جای‌گذاری میزان شعاع بحرانی در رابطه ۲، میزان کار بحرانی مورد نیاز برای رسیدن سلول به شعاع بحرانی مطابق با رابطه ۵ حاصل می‌شود.

$$\Delta W_{cr} = \frac{16\pi\gamma_{lg}^3}{3(P_{bub} - P_{local})^2} \quad (۵)$$

۳-۲-۲- هسته‌زایی همگن واقعی

در ادامه به بررسی مدل واقعی در هسته‌زایی همگن با در نظر گرفتن حفره‌های از قبل موجود پرداخته می‌شود. براساس این مدل، تغییرات کار از حالت ۱ به حالت ۲ مطابق با رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$\Delta W_{hom} = -(P_{bub,2} - P_{local})(V_{bub,2} - V_{bub,1}) - (P_{bub,2} - P_{bub,1})V_{bub,1} + \gamma_{lg}(A_{bub,2} - A_{bub,1}) \quad (۶)$$

با جای‌گذاری مساحت و حجم حباب‌ها و توجه به این نکته که هر

دیگر اگر حفره‌های اولیه‌ای داخل سیستم وجود داشته باشد (به صورت مثال روی عوامل هسته‌زا، ناخالصی‌های موجود، سطوح دستگاه‌ها و غیره)، احتمال هسته‌زایی سلولی روی این حفره‌ها بیشتر از حالتی است که سلول‌ها به خودی خود به وجود آیند (هسته‌زایی کلاسیک). محاسبات به صورت تفصیلی در یک مرجع [36] آورده شده است.

در بخش بعدی، میزان حلالیت گاز داخل پلیمر به عنوان پارامتری کلیدی در فرآیند فوم معرفی خواهد شد. بنابراین در این بخش لازم است که با قانون معروف هنری آشنا شویم. حلالیت، میزان جرمی از گاز را نشان می‌دهد که در یک دما و فشار معین می‌تواند داخل پلیمر حل شود. میزان حلالیت با استفاده از قانون هنری طبق رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود [43].

$$C = \left(\frac{1}{H}\right)P \quad (17)$$

که C میزان غلظت گاز حل شده بر حسب درصد وزنی، P فشار گاز و $1/H$ ثابت قانون هنری است که از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود [43].

$$\frac{1}{H} = A \times \exp\left(\frac{-E_s}{RT}\right) \quad (18)$$

که A ضریبی ثابت، R ثابت جهانی گاز، T دمای گاز و E_s گرمای انحلال بر حسب کالری بر مول است. روابط ۱۷ و ۱۸ نشان می‌دهند که میزان حلالیت با فشار، رابطه مستقیم و با دما رابطه عکس دارد، به طوری که با افزایش فشار و دما، میزان حلالیت گازهای داخل پلیمر به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. البته شایان ذکر است که رفتار حلالیت گاز نیتروژن نسبت به دما برعکس تمامی گازهای دیگر است، به گونه‌ای که با افزایش دما، میزان حلالیت گاز نیتروژن افزایش می‌یابد [44, 45].

در این بخش، مرحله هسته‌زایی سلولی که مهم‌ترین مرحله برای دستیابی به ساختارهایی با چگالی سلولی بالا/اندازه سلولی پایین است، به صورت مفصل مورد بررسی قرار گرفت و روابط شعاع بحرانی و کار بحرانی در تمامی حالات ارایه شد. در بخش بعدی، راهکارهای مورد استفاده به منظور حصول چگالی‌های سلولی بالا/اندازه‌های سلولی پایین مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتها مهم‌ترین تحقیقات اخیر در زمینه فوم‌های پلیمری به روش‌های مختلف فرآیندی که در بخش‌های قبلی معرفی شدند، ارایه خواهد شد.

۴- راهکارهای افزایش چگالی سلولی/کاهش اندازه سلولی

در این بخش مهم‌ترین راهکارهایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت که در سالیان اخیر توسط محققان مختلف به منظور افزایش نرخ هسته‌زایی مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۱- استفاده از عوامل هسته‌زا

یکی از موثرترین راهکارها به منظور افزایش نرخ هسته‌زایی، استفاده از عوامل هسته‌زایی مانند پودر تالک در خلال فرآیند فوم است. همان طور که در بخش قبلی به صورت مفصل مورد بررسی قرار گرفت، استفاده از عوامل هسته‌زا سبب غیرهمگن شدن فرآیند هسته‌زایی می‌شود و متعاقباً مقدار کار بحرانی برای رساندن سلول‌ها به شعاع بحرانی کاهش می‌یابد. بنابراین سلول‌های بیشتری شانس رسیدن به شعاع بحرانی و شروع فرآیند رشد خودبه‌خودی را پیدا می‌کنند. بر این اساس، نرخ هسته‌زایی و چگالی سلولی بیشتر می‌شود و امکان تولید ساختارهایی با اندازه‌های سلولی پایین افزایش می‌یابد. از جمله تحقیقاتی که از این راهکار به منظور افزایش نرخ هسته‌زایی استفاده کرده‌اند،

همچنین γ_{sg} ، γ_{sl} و γ_{lg} نیز به ترتیب کشش‌های سطحی بین حباب و عامل هسته‌زا، بین عامل هسته‌زا و پلیمر مذاب و بین حباب و پلیمر مذاب هستند. بین کشش‌های سطحی، رابطه ۱۰ برقرار است [39, 40].

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos \theta_c \quad (10)$$

با استفاده از رابطه ۹ می‌توان شعاع بحرانی را به صورت رابطه ۱۱ محاسبه کرد.

$$R_{cr} = \frac{2\gamma_{lg}}{P_{bub} - P_{local}} \quad (11)$$

که نشان می‌دهد میزان شعاع بحرانی در مدل هسته‌زایی کلاسیک غیرهمگن با مدل‌های هسته‌زایی همگن برابر است. با جای‌گذاری مقدار شعاع بحرانی در رابطه ۹، میزان کار بحرانی در مدل هسته‌زایی غیرهمگن کلاسیک به صورت رابطه ۱۲ حاصل می‌شود.

$$\Delta W_{het} = \frac{16\pi\gamma_{lg}^3}{3(P_{bub} - P_{local})^2} \times F = \Delta W_{hom} \times F \quad (12)$$

که F فاکتوری بوده که وابسته به هندسه مساله است و از رابطه ۱۳ به دست می‌آید.

$$F(\theta_c, \beta) = \frac{1}{4} \left[2 - 2 \sin(\theta_c - \beta) + \frac{\cos \theta_c \cos^2(\theta_c - \beta)}{\sin \beta} \right] \quad (13)$$

مشاهدات هندسی نشان می‌دهند که در تمامی حالات ممکن از جمله حالت‌های شکل ۴، میزان F همواره کمتر از یک است. به عبارتی دیگر، همواره در حالت هسته‌زایی غیرهمگن (در حضور عوامل هسته‌زا) میزان انرژی لازم برای رساندن حباب به شعاع بحرانی کمتر از حالت هسته‌زایی همگن است. در واقع اگر عوامل هسته‌زا به فرآیند اضافه شود، سطح انرژی مورد نیاز برای رساندن حباب‌ها به شعاع بحرانی که لازمه رشد خودبه‌خودی سلول‌ها است، پایین می‌آید و تعداد سلول‌های بیشتری می‌توانند شرایط رشد را به دست آورند و بر این اساس چگالی سلولی، افزایش و متعاقباً اندازه سلولی کاهش می‌یابد [36, 39-41].

۳-۲-۲- هسته‌زایی غیرهمگن واقعی

طبق این مدل، میزان تغییرات کار براساس مدل هسته‌زایی واقعی طبق رابطه ۱۴ به دست می‌آید.

$$\Delta W_{het} = -(P_{bub,2} - P_{local})V_{bub,2} + (\gamma_{sg} - \gamma_{sl})A_{sg,2} + \gamma_{lg}A_{lg,2} - [(P_{bub,1} - P_{local})V_{bub,1} + (\gamma_{sg} - \gamma_{sl})A_{sg,1} + \gamma_{lg}A_{lg,1}] \quad (14)$$

با در نظر گرفتن رابطه ۱۰ بین کشش‌های سطحی و جای‌گذاری حجم و مساحت‌های مورد نیاز در رابطه ۱۴ و مشتق‌گیری از آن، روابط شعاع بحرانی و کار بحرانی به ترتیب طبق روابط ۱۵ و ۱۶ حاصل می‌شوند [40-42].

$$R_{cr} = \frac{2\gamma_{lg}}{P_{bub} - P_{local}} \quad (15)$$

$$\Delta W_{het} = \frac{16\pi\gamma_{lg}^3}{3(P_{bub} - P_{local})^2} \times F - \frac{4\pi R_{bub,1}^2 \times F}{3} [(P_{local} - P_{bub,1})R_{bub,1} + 3\gamma_{lg}] \quad (16)$$

رابطه ۱۶ نشان می‌دهد که میزان کار بحرانی در حالت واقعی مدل هسته‌زایی غیرهمگن نسبت به مدل کلاسیک کمتر است. به عبارتی

۴-۲- افزایش میزان حلالیت گاز

در رابطه ۱۷ که به معادله هنری مشهور است، میزان فشار حباب به صورت حاصل ضرب غلظت گاز در ثابت هنری تعریف می‌شود. با جای‌گذاری مقدار فشار حباب از این رابطه در رابطه شعاع بحرانی (رابطه ۱۵)، می‌توان به رابطه ۱۹ دست یافت [37, 51, 52].

$$R_{cr} = \frac{2\gamma_{lg}}{HC - P_{local}} \quad (19)$$

بر اساس رابطه ۱۹، هر چه میزان غلظت گاز موجود (C) افزایش یابد، شعاع بحرانی کمتر می‌شود و تعداد سلول‌های بیشتری می‌توانند به مرز بحرانی برسند، بنابراین چگالی سلولی افزایش خواهد یافت. محققان قبلاً بر این باور بودند که در طول فرآیند فوم‌کردن، میزان شعاع بحرانی یک پارامتر ثابت است، در حالی که در سال‌های اخیر دریافته‌اند که به دلیل تغییر میزان غلظت گاز موجود در مخلوط تک‌فاز پلیمر/گاز (به دلیل مصرف گاز برای فرآیندهای هسته‌زایی سلولی و رشد سلولی)، مقدار شعاع بحرانی در طول فرآیند تغییر می‌کند. افزایش میزان حلالیت گاز می‌تواند از طرق مختلفی مانند افزایش فشار اشباع که طبق رابطه ۱۷ باعث افزایش غلظت گاز می‌شود یا کاهش دما (برای گاز کربن‌دی‌اکسید)، حاصل شود.

۴-۳- ایجاد فشارهای موضعی منفی (تنش‌های کششی)

در رابطه شعاع بحرانی (رابطه ۱۵)، P_{local} به صورت فشار داخلی دستگاه فرآیند در نظر گرفته می‌شود، هر چند که در حقیقت فشارهای موضعی خصوصاً در اطراف عوامل هسته‌زا مدام در حال نوسان هستند. بنابراین فشار موضعی به صورت مجموع فشارهای سیستم و تغییرات فشار موضعی تعریف می‌شود و شعاع بحرانی را می‌توان به صورت رابطه ۲۰ بیان کرد [51, 52].

$$R_{cr} = \frac{2\gamma_{lg}}{P_{bub} - (P_{sys} + \Delta P_{local})} \quad (20)$$

که ΔP_{local} نوسانات فشارهای موضعی است. اگر این نوسانات فشارهای موضعی مثبت باشند، به عبارتی تنش‌ها فشاری باشند، مطابق با رابطه ۲۰، میزان شعاع بحرانی بالا می‌رود که برای هسته‌زایی سلولی نامطلوب است. از طرفی دیگر اگر بتوان تنش‌های کششی ایجاد کرد، ΔP_{local} منفی خواهد بود و با توجه به رابطه، میزان شعاع بحرانی کاهش می‌یابد و باعث افزایش چگالی سلولی می‌شود. بنابراین می‌توان گفت هر عاملی که باعث به وجود آمدن تنش‌های کششی در سیستم شود، برای هسته‌زایی سلولی فرآیند فوم مطلوب است.

۴-۴- افزودن ذرات معدنی

افزودن ذرات معدنی علاوه بر ایفای نقش عامل هسته‌زایی، از طریق مکانیزم‌های دیگری می‌تواند باعث افزایش نرخ هسته‌زایی شود که هدف در این بخش بررسی این مکانیزم‌هاست نه نقش هسته‌زایی. افزودن ذرات معدنی توسط دو مکانیزم مختلف، روی تنش‌های موضعی بر هسته‌زایی سلولی تأثیر می‌گذارد که از این طریق باعث بهبود شرایط فوم‌شدن می‌شود. مکانیزم اول، به این صورت است که به دلیل صفر بودن سرعت جریان مذاب در دیواره‌های قالب، پروفیل سرعت خطی در جریان حاکم است که به دلیل تغییر سرعت نسبت به فاصله از دیواره‌ها، یک جریان چرخشی در اطراف ذرات معدنی ایجاد می‌شود که باعث چرخش این ذرات می‌شود. با چرخش ذرات معدنی، تنش‌های کششی ایجاد می‌شود و همان طور که در قسمت قبل بیان شد، این تنش‌ها باعث کاهش شعاع بحرانی و افزایش هسته‌زایی و در نتیجه افزایش چگالی سلولی می‌شوند [53].

مکانیزم دوم بدین صورت است که رشد حباب باعث ایجاد کشش‌های دوماحوره در سطوح حباب در حال رشد می‌شود که این عامل به نوبه خود سبب به وجود آمدن تنش‌های کششی در کناره‌های ذرات معدنی می‌شود [54].

برای مقایسه ذرات معدنی با نسبت‌های منظر (نسبت طول به قطر) متفاوت می‌توان گفت که ذرات معدنی با نسبت منظر بالاتر، مقاومت بیشتری در مقابل حرکت با جریان مذاب دارند و تغییرات فشار بیشتری ایجاد می‌کنند و تنش‌های بیشتری در اطراف آنها تجمع می‌یابند. در کل تغییرات تنش در اطراف ذرات معدنی با نسبت منظر بالاتر، بیشتر از ذرات مشابه با نسبت منظر پایین‌تر بوده است و تنش‌های کششی بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند که برای هسته‌زایی فرآیند فوم مطلوب هستند [55].

۴-۵- ایجاد کریستال‌ها

از دیگر عوامل تأثیرگذار بر هسته‌زایی فرآیند فوم، تشکیل کریستال‌ها در داخل پلیمر است. تحقیقات مختلف [56, 57] نشان داده است که تشکیل ساختارهای کریستالی و هر فرآیندی که بتواند میزان این کریستال‌ها را افزایش دهد، برای فرآیند فوم مفید است. این اثرگذاری از طریق سه مکانیزم صورت می‌گیرد. اولین مکانیزم به این صورت است که با تشکیل ساختارهای کریستالی، گاز داخل کریستال‌ها به مرز آنها فرار می‌کند و بنابراین غلظت گاز در مرز این کریستال‌ها بالا می‌رود و طبق رابطه ۱۹، شعاع بحرانی پایین می‌آید و در این نواحی سلول‌های متعددی شکل می‌گیرند. از طرف دیگر، دومین مکانیزم یعنی تشکیل کریستال‌ها سبب می‌شود که مکانیزم انقباض‌های محلی به وجود آمده، سبب اعمال تنش‌های کششی از طرف کریستال‌ها به مذاب پلیمری شود و در نتیجه شعاع بحرانی پایین بیاید که برای فرآیند فوم مفید است. سومین مکانیزمی که باعث می‌شود تشکیل کریستال‌ها برای هسته‌زایی سلولی مفید باشد، به وجود آمدن تنش‌های کششی موضعی به دلیل حرکت این ذرات صلب در داخل پلیمر مذاب است و همان طور که اشاره شد، این تنش‌های کششی با پایین آوردن شعاع بحرانی، نقش بسزایی در افزایش هسته‌زایی فرآیند فوم ایفا می‌کنند.

۴-۶- استفاده از نانوذرات

نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که با افزودن نانوذرات به پلیمرها می‌توان میزان هسته‌زایی و در نتیجه چگالی سلولی را بالا برد. از مهم‌ترین دلایل این امر علاوه بر ایفای نقش هسته‌زایی این ذرات می‌توان به ایجاد تنش‌های کششی موضعی توسط آنها اشاره کرد. در یک تحقیق [58] نشان داده شده است که افزودن ۲٪ وزنی نانواکسید آهن به پلیمر پلی‌پروپیلن می‌تواند میزان چگالی سلولی را تا بیش از ۲/۵ برابر افزایش دهد. همچنین در یک تحقیق [59]، تغییرات چگالی سلولی بر حسب درصد وزنی نانورس بررسی و مشاهده شد که با افزودن ۲٪ وزنی نانورس، چگالی سلولی فوم پلیمر اکریلونیتریل‌بوتادین‌استایرن به میزان تقریباً ۸ برابر بهبود یافته است.

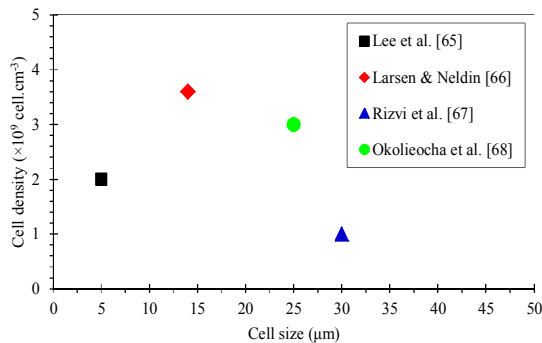
۵- فوم‌های پلیمری با چگالی‌های سلولی بالا/اندازه‌های سلولی پایین**۵-۱- فوم‌های پلیمری تولیدشده به روش توده‌ای**

دستاوردهای مهم‌ترین این تحقیقات که در سالیان اخیر صورت گرفته، در نمودار ۱ گردآوری شده است. قابل ذکر بوده که تحقیقات گسترده‌ای در زمینه افزایش چگالی سلولی/کاهش اندازه سلولی فوم‌های پلیمری به‌ویژه به روش توده‌ای صورت گرفته که در این قسمت فقط به ذکر مهم‌ترین آنها پرداخته شده است.

تحقیقات انتشار یافته تا اکنون، بیشترین میزان حلالیت گاز گزارش شده در یک پلیمر است. این میزان حلالیت بالا منجر به تولید فوم‌های نانوسلولی با اندازه‌های سلولی ۱۳ نانومتر و چگالی‌های سلولی $10^4 \times 7$ سلول در سانتی‌متر مکعب شد.

۵-۲- فوم‌های پلیمری تولید شده به روش اکستروژن

علی‌رغم امکان حصول نسبت‌های انبساط بسیار بالا توسط این روش فرآیندی، دستیابی به اندازه‌های سلولی پایین به اندازه روش توده‌ای امکان‌پذیر نبوده است. دستاوردهای مهم‌ترین این تحقیقات که در سالیان اخیر صورت گرفته در نمودار ۲ گردآوری شده است.



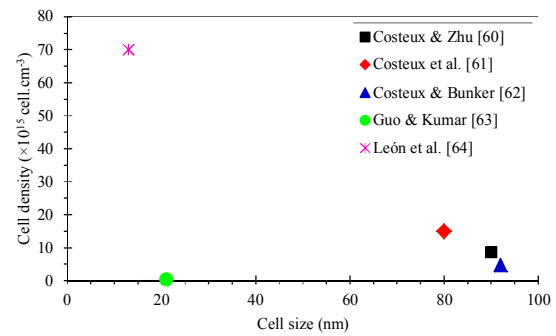
نمودار ۲) گراف چگالی سلولی بر حسب اندازه سلولی فوم‌های پلیمری تولید شده به روش فوم اکستروژن

لی و همکاران در سال ۲۰۰۶ [65] فوم اکستروژن پلی‌اتیلن را بررسی نمودند. با افزودن تنها ۰/۵٪ وزنی نانورس به‌عنوان عامل هسته‌زا توانستند به ساختارهای سلولی مناسبی با اندازه سلولی ۵ میکرومتر و چگالی سلولی $10^4 \times 2$ سلول در سانتی‌متر مکعب دست یابند. نتایج این تحقیق اثباتی بر کارایی نانوذرات در افزایش چگالی سلولی/کاهش اندازه سلولی است.

لارسن و نلدین در سال ۲۰۱۳ [66] فوم اکستروژن پلی‌لاکتیک‌اسید را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که استفاده از گریدهایی از این پلیمر که استحکام مذاب بالاتر دارند، منجر به تولید فوم‌هایی با اندازه سلولی ۱۴ میکرومتر و چگالی سلولی $3/6 \times 10^4$ سلول در سانتی‌متر مکعب می‌شود.

ریزوی و همکاران در سال ۲۰۱۳ [67] به بررسی فوم اکستروژن پلی‌پروپیلن پرداختند. آنها نشان دادند که افزودن تنها ۰/۳٪ نانوالیاف پلی‌تترافلوئورواتیلن باعث توانایی جذب گاز بیشتر پلیمر می‌شود. همچنین نشان دادند که با کاهش دمای فوم‌کردن، میزان حلالیت گاز کربن‌دی‌اکسید در هر دو نمونه پلی‌پروپیلن خالص و پلی‌پروپیلن حاوی نانوالیاف پلی‌تترافلوئورواتیلن افزایش می‌یابد. در شرایط دمایی بهینه توانستند به اندازه‌های سلولی ۳۰ میکرومتر و چگالی سلولی 10^4 سلول در سانتی‌متر مکعب دست یابند.

اکولیوچا و همکاران در سال ۲۰۱۵ [68] فوم اکستروژن پلی‌استایرن را بررسی نمودند. آنها از سه نوع ذرات گرافن، تالک و نانولوله‌های کربنی چنددیواره به‌منظور بهبود خواص ساختاری استفاده کردند و نشان دادند که بهترین خواص ساختاری فوم پلی‌استایرن در حضور ذرات گرافن حاصل شد که دلیل آن، مساحت سطح بیشتر این ذرات در مقایسه با دیگر ذرات بود. همان‌طور که قبلاً بیان شد، ذرات با سطح بیشتر، مقاومت بیشتری در مقابل جریان سیال دارند و تنش‌های موضعی بیشتری تولید می‌کنند که برای فرآیند فوم مطلوب است. همچنین مشاهدات میکروسکوپی نشان از پخش



نمودار ۱) گراف چگالی سلولی بر حسب اندازه سلولی فوم‌های پلیمری تولید شده به روش فوم توده‌ای

کستئوکس و ژو در سال ۲۰۱۳ [60] با استفاده از روش فوم توده‌ای ناشی از فشار توانستند فوم‌های نانوسلولی کوپلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات-اتیل‌متاکریلات را تولید نمایند. آنها از فشار و دمای فوم به ترتیب ۳۰ مگاپاسکال و 40°C به‌منظور اشباع نمونه‌ها استفاده کردند که در این حالت، حلالیت گاز کربن‌دی‌اکسید در پلیمر ۳۰٪ بود. با افزودن ۵/۵٪ وزنی ذرات سیلیکا توانستند به اندازه‌های سلولی ۹۰ نانومتر و چگالی‌های سلولی $8/6 \times 10^5$ سلول در سانتی‌متر مکعب دست یابند. نتایج این تحقیق اثباتی بر راهکار استفاده از نانوذرات در افزایش چگالی سلولی در فوم‌های پلیمری است.

در تحقیق مشابه دیگری، کستئوکس و همکاران در سال ۲۰۱۵ [61] روش فوم مشابهی را بررسی نمودند. در این تحقیق از ذرات سیلیکا استفاده نشد، ولی میزان اتیل‌متاکریلات افزایش یافت که ماهیت جذب گاز بالایی دارد. میزان حلالیت گاز نسبت به تحقیق قبلی [60] از ۳۰٪ وزنی به ۴۰٪ افزایش یافت. با افزایش میزان حلالیت، اندازه‌های سلولی به ۸۰ نانومتر کاهش و چگالی‌های سلولی به $10^5 \times 15$ سلول در سانتی‌متر مکعب افزایش یافت. نتایج این تحقیق نیز اثباتی بر کارآمدی راهکار افزایش حلالیت گاز به‌منظور حصول ساختارهای سلولی بهتر است.

در تحقیقی دیگر، کستئوکس و همکاران در سال ۲۰۱۳ [62]، از کوپلیمرهای پلی (استایرن‌اکریلونیتریل/متیل‌متاکریلات)-اتیل‌اکریلات برای تولید فوم‌های پلیمری نانوسلولی با اندازه‌های سلولی ۹۲ نانومتر و چگالی سلولی $10^5 \times 4/7$ سلول در سانتی‌متر مکعب استفاده کردند. استفاده از متیل‌متاکریلات-اتیل‌اکریلات که به دلیل ماهیت آن پتانسیل بالایی در جذب گاز کربن‌دی‌اکسید دارد، باعث افزایش غلظت گاز از ۲۱/۹ به ۳۶/۶٪ و همچنین افزایش چگالی سلولی و حصول ساختار نانوسلولی شد.

گوو و کومار در سال ۲۰۱۵ [63] با استفاده از روش توده‌ای ناشی از دما (دومرحله‌ای)، فوم‌های نانوسلولی پلی‌کربنات با اندازه‌های سلولی ۲۱ نانومتر و چگالی سلولی $10^4 \times 4/1$ سلول در سانتی‌متر مکعب تولید کردند. همان‌طور که قبلاً بیان شد، یکی از راهکارهای افزایش حلالیت گاز کربن‌دی‌اکسید، کاهش دمای اشباع است. بر همین اساس، آنها با استفاده از دمای اشباع 30°C توانستند حلالیت گاز را تا ۲۰/۴٪ افزایش دهند. شایان ذکر است که آنها در تحقیق خود از هیچ گونه عامل هسته‌زایی استفاده نکردند و پیش‌بینی می‌شود که استفاده از عوامل هسته‌زا می‌توانست ساختارهای سلولی مطلوب‌تری را حاصل کند.

مارتین-دائون و همکاران در سال ۲۰۱۷ [64] با استفاده از دمای اشباع 32°C و فشار اشباع ۲۰ مگاپاسکال توانستند به حلالیت ۴۸٪ گاز کربن‌دی‌اکسید در پلی‌متیل‌متاکریلات دست یابند که بین

نانوالیاف تا ۵٪ وزنی توانستند به اندازه‌های سلولی ۲۰ میکرومتر دست یابند. همچنین چگالی سلولی با افزودن ۱٪ وزنی نانوالیاف از 10^5 به 10^8 سلول در سانتی‌متر مکعب افزایش یافت و توانستند با افزودن بیشتر درصد وزنی نانوالیاف تا ۵٪ به چگالی سلولی 10^9 سلول در سانتی‌متر مکعب دست یابند.

۶- نتیجه‌گیری

فوم‌های پلیمری به دلیل خواص منحصر به فرد خود کاربردهای گسترده‌ای را در صنایعی مانند خودروسازی، هوافضا، حمل و نقل، ساخت و ساز، بسته‌بندی و غیره به خود اختصاص داده‌اند. در قرن جدید تحقیقات گسترده‌ای روی فوم‌های پلیمری صورت گرفته که نتایج این تحقیقات نشان داده که برای دستیابی به خواص ویژه این مواد لازم است تا چگالی سلولی افزایش/اندازه سلولی کاهش یابد. افزایش هسته‌زایی سلولی لازمه دستیابی به فوم‌های میکروسلولی و نانوسلولی است. در همین راستا، در تحقیق حاضر، مرحله هسته‌زایی سلولی به صورت مفصل بررسی شده و مهم‌ترین راهکارها به منظور دستیابی به هسته‌زایی‌های سلولی بالا تشریح شده است. در ادامه، مهم‌ترین تحقیقات و دستاوردهای محققان در سالیان اخیر به روش‌های فرآیندی مختلف (توده‌ای، اکستروژن و قالب‌گیری تزریقی) ارایه شده است. براساس مطالعات گسترده صورت گرفته که مهم‌ترین آنها در بخش قبلی ارایه شده است، در مورد مقایسه روش‌های فرآیندی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- روش فرآیندی توده‌ای به‌ویژه روش توده‌ای ناشی از فشار (تک‌مرحله‌ای) بهترین گزینه برای دستیابی به ساختارهای فوم نانوسلولی با چگالی‌های سلولی بالاتر از 10^9 سلول در سانتی‌متر مکعب است. هر چند که این روش برای کاربردهای صنعتی نبوده است و بیشتر جنبه آزمایشگاهی دارد.

۲- در روش فوم اکستروژن علی‌رغم ارایه فوم‌های پلیمری با چگالی‌های پایین (نسبت‌های انبساط بالا)، تحقیقات بسیار محدودی مبنی بر دستیابی به ساختارهای نانوسلولی گزارش شده است.

۳- در روش فوم قالب‌گیری تزریقی، تحقیقات بسیار اندکی مبنی بر دستیابی به ساختارهای میکروسلولی (اندازه سلولی کمتر از 10^9 میکرومتر) گزارش شده است.

براساس بررسی‌های صورت گرفته روی تحقیقاتی که در آنها به چگالی‌های سلولی بالا/اندازه‌های سلول پایین دست یافته‌اند، مهم‌ترین راهکارها برای حصول ساختارهای میکروسلولی و نانوسلولی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

۱- استفاده از عوامل هسته‌زایی نظیر پودر تالک
۲- استفاده از نانوذراتی همچون نانورس، نانولوله‌های کربنی چنددیواره و غیره

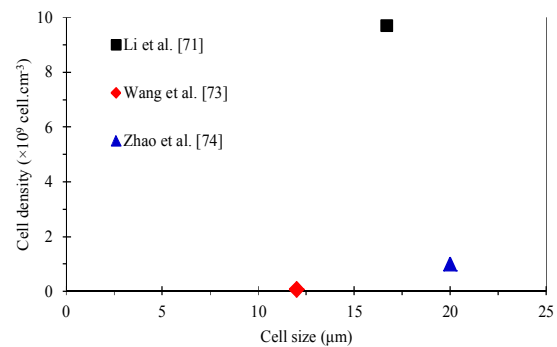
۳- افزایش حلالیت گاز داخل پلیمر به وسیله افزایش فشار اشباع یا کاهش دمای اشباع یا استفاده از پلیمرهایی که ماهیت جذب گاز بالایی دارند مانند پلی‌متیل متاکریلات.

علی‌رغم تلاش‌های محققان در سالیان اخیر به منظور افزایش چگالی سلولی/کاهش اندازه سلولی که با موفقیت‌های چشمگیری نیز همراه بوده است، نباید از یکی از مهم‌ترین خواص فوم‌های پلیمری که چگالی است، غافل شد. به نظر می‌رسد که ارایه تحقیقی که به بررسی دستاوردهای سالیان اخیر در زمینه کاهش چگالی/افزایش نسبت انبساط بپردازد، لازم و ضروری است. قابل ذکر است که دستیابی به فوم‌هایی با چگالی پایین/نسبت انبساط بالا، نیازمند بررسی گسترده و دقیق مرحله رشد سلولی است که پس

مناسب‌تر این ذرات در ماتریس پلیمری داشت. آنها با افزودن ۱٪ وزنی ذرات گرافن توانستند به اندازه‌های سلولی ۲۵ میکرومتر و چگالی سلولی $10^9 \times 3$ سلول در سانتی‌متر مکعب دست یابند.

۵-۳- فوم‌های پلیمری تولیدشده به روش قالب‌گیری تزریقی

محاسبه اندازه سلولی در فوم‌های پلیمری تولیدی به روش قالب‌گیری تزریقی دشوار است، چرا که این فوم‌ها معمولاً توزیع اندازه سلولی گسترده‌ای دارند و معمولاً ساختارهای سلولی آنها را چندگانه می‌نامند. به این معنی که سلول‌های ریز و درشت متفاوتی در ساختار آنها مشاهده می‌شود [69, 70]. دستاوردهای مهم‌ترین تحقیقات در زمینه فوم‌های پلیمری تولیدی به روش قالب‌گیری تزریقی که در سالیان اخیر صورت گرفته است در نمودار ۳ گردآوری شده است.



نمودار ۳) گراف چگالی سلولی بر حسب اندازه سلولی فوم‌های پلیمری تولیدشده به روش فوم قالب‌گیری تزریقی

لی و همکاران در سال ۲۰۱۳ [71] به بررسی فوم‌های پلی‌اترایمید تولیدی به روش قالب‌گیری تزریقی پرداختند. آنها با افزودن تنها ۱٪ وزنی نانولوله کربنی چنددیواره مشاهده کردند که اندازه سلولی به میزان ۲۸/۳٪ نسبت به حالت خالص کاهش می‌یابد. در بهترین شرایط فرآیندی به اندازه‌های سلولی $16/7$ میکرومتر و چگالی سلولی $9/7 \times 10^9$ سلول در سانتی‌متر مکعب دست یافتند.

ثرو و همکاران در سال ۲۰۱۴ [72] به بررسی تاثیر افزودن نانوذرات رس روی خواص ساختاری فوم‌های پلی‌لاکتیک اسید در فرآیند فوم قالب‌گیری تزریقی پرداختند. آنها مشاهده کردند که با افزودن ۳٪ وزنی نانوذرات رس، اندازه سلولی از $475/6$ به $261/4$ میکرومتر کاهش یافت که به دلیل نقش بسزای نانوذرات در فرآیند هسته‌زایی است. در این شرایط چگالی‌های سلولی به میزان $7/7 \times 10^9$ سلول در سانتی‌متر مکعب حاصل شد. قابل ذکر است که به دلیل تفاوت زیاد در چگالی سلولی یک تحقیق [72] با سایر تحقیقات، نتایج آن در نمودار ۳ ارایه نشده است و هدف از نتایج آن، نشان دادن تاثیر چشمگیر نانوذرات در هسته‌زایی فوم‌های قالب‌گیری تزریقی بود.

وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [73] به بررسی فرآیند فوم قالب‌گیری تزریقی پلی‌پروپیلن پرداختند. آنها توانستند با افزودن ۵٪ وزنی نانوالیاف سلولز، اندازه سلولی را از ۱۲۵ به ۱۲ میکرومتر کاهش دهند. در این شرایط، چگالی سلولی از $2/5 \times 10^9$ به $7/4 \times 10^9$ افزایش یافت.

ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۸ [74] به بررسی فرآیند فوم قالب‌گیری تزریق قالب- باز پلی‌پروپیلن پرداختند. آنها در تحقیق خود از نانوالیاف پلی‌تترافلورواتیلن به منظور بهبود خواص ساختاری استفاده و مشاهده کردند که با افزودن ۱٪ وزنی نانوالیاف ذکرشده، اندازه سلولی از ۴۰۰ به ۴۰ میکرومتر کاهش یافت و با افزایش بیشتر

Engineering Materials and Technology. 1994;116(4):439-445.

13- Matuana LM, Park CB, Balatinecz JJ. Cell morphology and property relationships of microcellular foamed pvc/wood-fiber composites. *Polymer Engineering and Science*. 1998;38(11):1862-1872.

14- Okolieocha C, Beckert F, Herling M, Breu J, Mülhaupt R, Altstädt V. Preparation of microcellular low-density PMMA nanocomposite foams: Influence of different fillers on the mechanical, rheological and cell morphological properties. *Composites Science and Technology*. 2015;118:108-116.

15- Notario B, Pinto J, Solorzano E, De Saja JA, Dumon M, Rodríguez-Pérez MA. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams. *Polymer*. 2015;56:57-67.

16- Wang G, Wang C, Zhao J, Wang G, Park CB, Zhao G. Modelling of thermal transport through a nanocellular polymer foam: Toward the generation of a new superinsulating material. *Nanoscale*. 2017;9(18):5996-6009.

17- Ruiz JAR, Vincent M, Agassant JF, Sadik T, Pillon C, Carrot C. Polymer foaming with chemical blowing agents: Experiment and modeling. *Polymer Engineering and Science*. 2015;55(9):2018-2029.

18- Nalawade SP, Picchioni F, Janssen LPBM. Supercritical carbon dioxide as a green solvent for processing polymer melts: Processing aspects and applications. *Progress in Polymer Science*. 2006;31(1):19-43.

19- Saucéau M, Fages J, Common A, Nikitine C, Rodier E. New challenges in polymer foaming: A review of extrusion processes assisted by supercritical carbon dioxide. *Progress in Polymer Science*. 2011;36(6):749-766.

20- Azdast T, Lee EK, Lee K, Park CB, Behraves AH, Folland R, et al. Extrusion foaming of high-melt-strength PP with supercritical carbon dioxide II - expansion behaviors. In: *Rapra Technology*, Whalen L, Reedy MME, Bowman JM, Leung SN, Robin ML, et al. *Blowing agents and foaming processes 2008: Conference proceedings*. Shrewsbury: Ismithers Rapra Publishing; 2008.

21- Lotti C, Bretas RES. Correlations between injection molding parameters, morphology and mechanical properties of PPS using artificial neural networks. *International Polymer Processing*. 2006;21(2):104-115.

22- Bledzki AK, Kirschling H, Rohleder M, Čate A. Correlation between injection moulding processing parameters and mechanical properties of microcellular polycarbonate. *Journal of Cellular Plastics*. 2012;48(4):301-340.

23- Kramschuster A, Gong S, Turng LS, Li T, Li T. Injection-molded solid and microcellular polylactide and polylactide nanocomposites. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 2007;1(1):37-45.

24- Pilla S, Kramschuster A, Yang L, Lee J, Gong S, Turng LS. Microcellular injection-molding of polylactide with chain-extender. *Materials Science and Engineering C*. 2009;29(4):1258-1265.

25- Ameli A, Jahani D, Nofar M, Jung PU, Park CB. Development of high void fraction polylactide composite foams using injection molding: Mechanical and thermal insulation properties. *Composites Science and Technology*. 2014;90:88-95.

26- Najafi N, Heuzey MC, Carreau PJ, Therriault D, Park CB. Mechanical and morphological properties of injection molded linear and branched-poly(lactide) (PLA)

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از تمامی دوستان و همکارانی که در آماده‌سازی این مقاله به هر نحوی تاثیرگذار بوده‌اند، ابراز می‌دارند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که این مقاله حاصل دستاوردهای پژوهشی ایشان بوده و این مقاله یا بخشی از آن در هیچ مجله‌ی دیگری به چاپ نرسیده است.

تعارض منافع: نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که هیچگونه تعارض منافعی بین هر یک از عوامل مشارکت کننده در تولید این مقاله (حامیان مالی، پشتیبانان علمی و نویسندگان) وجود ندارد.

سهم نویسندگان: طاهر ازدست (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۷۰٪); رزگار حسن‌زاده (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۳۰٪)

منابع مالی: هیچگونه منابع مالی برای تحقیق حاضر در دسترس نبوده است.

منابع

- 1- Wypych G. *Handbook of polymers*. Amsterdam: Elsevier Science; 2016.
- 2- Lee ST, Ramesh NS, editors. *Polymeric foams: Mechanisms and materials*. Boca Raton: CRC Press; 2004.
- 3- Wicklein B, Kocjan A, Salazar-Alvarez G, Carosio F, Camino G, Antonietti M, et al. Thermally insulating and fire-retardant lightweight anisotropic foams based on nanocellulose and graphene oxide. *Nature Nanotechnology*. 2015;10(3):277-283.
- 4- Verdejo R, Stämpfli R, Alvarez-Lainez M, Mourad S, Rodriguez-Perez MA, Brühwiler PA, et al. Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*. 2009;69(10):1564-1569.
- 5- Notario B, Pinto J, Rodríguez-Pérez MA. Towards a new generation of polymeric foams: PMMA nanocellular foams with enhanced physical properties. *Polymer*. 2015;63:116-126.
- 6- Altan M. *Thermoplastic foams: Processing, manufacturing, and characterization*. In: Çankaya N, editor. *Polymerization*. London: IntechOpen; 2018. pp. 117-137.
- 7- Roberts RD, Kwok JC. Styrene-maleic anhydride copolymer foam for heat resistant packaging. *Journal of Cellular Plastics*. 2007;43(2):135-143.
- 8- Sorrentino L, Aurilia M, Iannace S. Polymeric foams from high-performance thermoplastics. *Advances in Polymer Technology*. 2011;30(3):234-243.
- 9- Lee RE, Hasanzadeh R, Azdast T. A multi-criteria decision analysis on injection moulding of polymeric microcellular nanocomposite foams containing multi-walled carbon nanotubes. *Plastics Rubber and Composites*. 2017;46(4):155-162.
- 10- Okolieocha C, Raps D, Subramaniam K, Altstädt V. Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004-2015) and future directions - a review. *European Polymer Journal*. 2015;73:500-519.
- 11- Bureau MN, Kumar V. Fracture toughness of high density polycarbonate microcellular foams. *Journal of Cellular Plastics*. 2006;42(3):229-240.
- 12- Kumar V, Vander Wel M, Weller J, Seeler KA. Experimental characterization of the tensile behavior of microcellular polycarbonate foams. *Journal of*

- balance and a PVT apparatus. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010;55(11):4885-4895.
- 44- Rindfleisch F, Di Noia TP, Mc Hugh MA. Solubility of polymers and copolymers in supercritical CO₂. *The Journal of Physical Chemistry*. 1996;100(38):15581-15587.
- 45- Han D, Tong X, Boissière O, Zhao Y. General strategy for making CO₂-switchable polymers. *ACS Macro Letters*. 2012;1(1):57-61.
- 46- Ameli A, Jahani D, Nofar MR, Jung PU, Park CB. Processing and characterization of solid and foamed injection-molded polylactide with talc. *Journal of Cellular Plastics*. 2013;49(4):351-374.
- 47- Naguib HE, Park CB, Lee PC. Effect of talc content on the volume expansion ratio of extruded PP foams. *Journal of Cellular Plastics*. 2003;39(6):499-511.
- 48- Wong A, Park CB. The effects of extensional stresses on the foamability of polystyrene-talc composites blown with carbon dioxide. *Chemical Engineering Science*. 2012;75:49-62.
- 49- Marrazzo C, Di Maio E, Iannace S. Conventional and nanometric nucleating agents in poly (ϵ -caprolactone) foaming: Crystals vs bubbles nucleation. *Polymer Engineering and Science*. 2008;48(2):336-344.
- 50- Leung SN, Wong A, Park CB, Zong JH. Ideal surface geometries of nucleating agents to enhance cell nucleation in polymeric foaming processes. *Journal of Applied Polymer Science*. 2008;108(6):3997-4003.
- 51- Ramesh NS, Rasmussen DH, Campbell GA. The heterogeneous nucleation of microcellular foams assisted by the survival of microvoids in polymers containing low glass transition particles, part I: Mathematical modeling and numerical simulation. *Polymer Engineering and Science*. 1994;34(22):1685-1697.
- 52- Lubetkin SD. Why is it much easier to nucleate gas bubbles than theory predicts?. *Langmuir*. 2003;19(7):2575-2587.
- 53- Wang C, Leung SN, Bussmann M, Zhai WT, Park CB. Numerical investigation of nucleating-agent-enhanced heterogeneous nucleation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010;49(24):12783-12792.
- 54- Lee YH, Park CB, Wang KH, Lee MH. HDPE-clay nanocomposite foams blown with supercritical CO₂. *Journal of Cellular Plastics*. 2005;41(5):487-502.
- 55- Chen L, Ozisik R, Schadler LS. The influence of carbon nanotube aspect ratio on the foam morphology of MWNT/PMMA nanocomposite foams. *Polymer*. 2010;51(11):2368-2375.
- 56- Taki K, Kitano D, Ohshima M. Effect of growing crystalline phase on bubble nucleation in poly (L-lactide)/CO₂ batch foaming. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011;50(6):3247-3252.
- 57- Wong A, Guo Y, Park CB. Fundamental mechanisms of cell nucleation in polypropylene foaming with supercritical carbon dioxide - effects of extensional stresses and crystals. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2013;79:142-151.
- 58- Daryadel M, Azdast T, Hasanzadeh R, Molani S. Simultaneous decision analysis on the structural and mechanical properties of polymeric microcellular nanocomposites foamed using CO₂. *Journal of Applied Polymer Science*. 2018;135(14):46098.
- 59- Azerag B, Azdast T, Doniavi A, Mamaghani Shishavan S, Lee RE. Structural properties of batch foamed acrylonitrile butadiene styrene/nanoclay nanocomposites. *International Journal of Mechanical and nanocomposite foams. European Polymer Journal*. 2015;73:455-465.
- 27- Peinado V, García L, Fernández Á, Castell P. Novel lightweight foamed poly (lactic acid) reinforced with different loadings of functionalised Sepiolite. *Composites Science and Technology*. 2014;101:17-23.
- 28- Pantani R, Volpe V, Titomanlio G. Foam injection molding of poly (lactic acid) with environmentally friendly physical blowing agents. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214(12):3098-3107.
- 29- Hasanzadeh R, Azdast T, Doniavi A, Esmaili P, Mamaghani S, Lee RE. Experimental investigation of properties of polymeric nanocomposite foams containing multi-walled carbon nanotubes using Taguchi method. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2016;2(4):37-44. [Persian]
- 30- Colton JS, Suh NP. Nucleation of microcellular foam: Theory and practice. *Polymer Engineering and Science*. 1987;27(7):500-503.
- 31- Colton JS, Suh NP. The nucleation of microcellular thermoplastic foam with additives: Part I: Theoretical considerations. *Polymer Engineering and Science*. 1987;27(7):485-492.
- 32- Shafi MA, Joshi K, Flumerfelt RW. Bubble size distributions in freely expanded polymer foams. *Chemical Engineering Science*. 1997;52(4):635-644.
- 33- Kim Y, Park CB, Chen P, Thompson RB. Origins of the failure of classical nucleation theory for nanocellular polymer foams. *Soft Matter*. 2011;7(16):7351-7358.
- 34- Guo Q, Wang J, Park CB, Ohshima M. A microcellular foaming simulation system with a high pressure-drop rate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2006;45(18):6153-6161.
- 35- Leung SN, Wong A, Wang LC, Park CB. Mechanism of extensional stress-induced cell formation in polymeric foaming processes with the presence of nucleating agents. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2012;63:187-198.
- 36- Wong A, Wijnands SFL, Kuboki T, Park CB. Mechanisms of nanoclay-enhanced plastic foaming processes: Effects of nanoclay intercalation and exfoliation. *Journal of Nanoparticle Research*. 2013;15:1815.
- 37- Leung SN, Wong A, Guo Q, Park CB, Zong JH. Change in the critical nucleation radius and its impact on cell stability during polymeric foaming processes. *Chemical Engineering Science*. 2009;64(23):4899-4907.
- 38- Kim SG, Leung SN, Park CB, Sain M. The effect of dispersed elastomer particle size on heterogeneous nucleation of TPO with N₂ foaming. *Chemical Engineering Science*. 2011;66(16):3675-3686.
- 39- Turnbull D, Vonnegut B. Nucleation catalysis. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1952;44(6):1292-1298.
- 40- Fletcher NH. Size effect in heterogeneous nucleation. *The Journal of Chemical Physics*. 1958;29(3):572.
- 41- Zhai W, Yu J, Wu L, Ma W, He J. Heterogeneous nucleation uniformizing cell size distribution in microcellular nanocomposites foams. *Polymer*. 2006;47(21):7580-7589.
- 42- Feng JJ, Bertelo CA. Prediction of bubble growth and size distribution in polymer foaming based on a new heterogeneous nucleation model. *Journal of Rheology*. 2004;48(2):439.
- 43- Hasan MM, Li YG, Li G, Park CB, Chen P. Determination of solubilities of CO₂ in linear and branched polypropylene using a magnetic suspension

- Mülhaupt R, et al. Influence of graphene on the cell morphology and mechanical properties of extruded polystyrene foam. *Journal of Cellular Plastics*. 2015;51(4):413-426.
- 69- Rizvi SJA, Alaei MH, Yadav A, Bhatnagar N. Quantitative analysis of cell distribution in injection molded microcellular foam. *Journal of Cellular Plastics*. 2014;50(3):199-219.
- 70- Shaayegan V, Wang G, Park CB. Effect of foam processing parameters on bubble nucleation and growth dynamics in high-pressure foam injection molding. *Chemical Engineering Science*. 2016;155:27-37.
- 71- Li J, Chen Z, Wang X, Liu T, Zhou Y, Luo S. Cell morphology and mechanical properties of microcellular mucell® injection molded polyetherimide and polyetherimide/fillers composite foams. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013;130(6):4171-4181.
- 72- Zhou J, Yao Z, Zhou C, Wei D, Li S. Mechanical properties of PLA/PBS foamed composites reinforced by organophilic montmorillonite. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014;131(18):40773.
- 73- Wang L, Ando M, Kubota M, Ishihara S, Hikima Y, Ohshima M, et al. Effects of hydrophobic-modified cellulose nanofibers (CNFs) on cell morphology and mechanical properties of high void fraction polypropylene nanocomposite foams. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*. 2017;98:166-173.
- 74- Zhao J, Zhao Q, Wang L, Wang C, Guo B, Park CB, et al. Development of high thermal insulation and compressive strength BPP foams using mold-opening foam injection molding with in-situ fibrillated PTFE fibers. *European Polymer Journal*. 2018;98:1-10.
- Materials Engineering. 2015;10:19.
- 60- Costeux S, Zhu L. Low density thermoplastic nanofoams nucleated by nanoparticles. *Polymer*. 2013;54(11):2785-2795.
- 61- Costeux S, Khan I, Bunker SP, Jeon HK. Experimental study and modeling of nanofoams formation from single phase acrylic copolymers. *Journal of Cellular Plastics*. 2014;51(2):197-221.
- 62- Costeux S, Bunker SP, Jeon HK. Homogeneous nanocellular foams from styrenic-acrylic polymer blends. *Journal of Materials Research*. 2013;28(17):2351-2365.
- 63- Guo H, Kumar V. Some thermodynamic and kinetic low-temperature properties of the PC-CO₂ system and morphological characteristics of solid-state PC nanofoams produced with liquid CO₂. *Polymer*. 2015;56:46-56.
- 64- Martín-de León J, Bernardo V, Rodríguez-Pérez MÁ. Key production parameters to obtain transparent nanocellular PMMA. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2017;302(12):1700343.
- 65- Lee YH, Wang KH, Park CB, Sain M. Effects of clay dispersion on the foam morphology of LDPE/clay nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2007;103(4):2129-2134.
- 66- Larsen Å, Neldin C. Physical extruder foaming of poly (lactic acid) - processing and foam properties. *Polymer Engineering and Science*. 2013;53(5):941-949.
- 67- Rizvi A, Tabatabaei AR, Barzegari MR, Mahmood SH, Park CB. In situ fibrillation of CO₂-philic polymers: Sustainable route to polymer foams in a continuous process. *Polymer*. 2013;54(17):4645-4652.
- 68- Okolieocha C, Köppl T, Kerling S, Tölle FJ, Fathi A,